

מכון ויצמן למדע

ביקוע גרעיני – יחידת העשרה למורה

פרויקט גמר למורים בתוכנית רוטשילד - ויצמן

איתמר מלט ואלירן חן

בהנחיית פרופ' מיכאל קירסון וד"ר אמנון חזן

חשוון התשע"ג – אוקטובר 2012

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

3 מבוא

רקע מדעי למורה

5..... ביקוע גרעיני

5..... יציבות הגרעין

6..... תהליך הביקוע הגרעיני

7..... תגובת שרשרת

9..... מודל הטיפה

9..... הנוסחה הסמי אמפירית

16..... מספרי קסם

16..... הפערים שבין הנוסחה הסמי אמפירית לתוצאות המדידה

17..... מודל הקליפות

כלי הוראה

28..... דילמות מוסריות בנושא הגרעין

28..... רקע

28..... מטרות אופרטיביות

28..... מבנה היחידה

29..... קריסת פרדיגמה מדעית

31..... גילויים מדעיים בעלי השלכות מרחיקות לכת על האנושות

32..... שימושים בפצצת האטום

34..... ביבליוגרפיה

מבוא

עבודה זו, הינה למעשה אוסף של כלי ההעשרה המיועדים למורה הפיזיקה במסגרת תוכנית הבגרות ל-5 יח"ל הבנוי באופן הבא:

יחידה מדעית תיאורטית המכילה את הנושאים:

ביקוע גרעיני

הנוסחה הסמי אמפירית

מספרי הקסם

הנושאים מדורגים מהקל אל הקשה הן מבחינת רמת ההרחבה של החומר והן מבחינת הרמה המתמטית וכך מאפשרים לכל מורה לבחור בהתאם ליכולתו ורצונו ברמה המתאימה.

וכן יחידה שניה המהווה כלי להעשרת ההוראה ונוגעת בדילמות מוסריות הקשורות לתחום ביקוע הגרעין בהקשרים פיזיקליים שונים.

מספר סיבות הובילו אותנו לבחור בנושא זה:

הרלוונטיות של הנושא לחיי היומיום בהקשר של מרוץ החימוש בעולם ככלל ובמזדה"ת בפרט, העניין והחשש שהוא יוצר אצל התלמידים, מהווים גורם מדרבן לעסוק בו ברמה הגבוהה יותר.

נוצר רושם שהנושא נדחק לשולי תוכנית הלימודים וכך נוצר מצב שמורים לא תמיד מגיעים אליו ולכן זקוקים בו לחיזוק.

משבר האנרגיה העולמי, מעלה את נושא האנרגיה הגרעינית, ביקוע והיתוך, לדיון ציבורי. ללא ידע בתחום הדיון נהיה רדוד וחסר משמעות.

הנושא מרתק גם ללא הרלוונטיות שלו בחיי היומיום, שכן היכולת המדהימה של האדם לחקור את מעמקי החומר והתוצאות הבלתי צפויות הנובעות מכך מעניינות ומעוררות שאלות רבות.

רציונל

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

העבודה, בעיקרה, אינה באה לחדש ברמת הנושאים התיאורטיים בפיזיקה, אלא לרכז אותם לכדי אוסף אחד המונח בפני המורה בשפה הנוחה יותר לקריאה מאשר השפה המדעית (מלבד נושא "מספרי הקסם שקצת חורג ממגמה זו אך עדיין יכול לשמש את המורה) ◦

ביחידה של כלי ההוראה, השתדלנו ליצוק תוכן עובדתי שלא בהכרח מוכר לכל כדי להפרות את הדין וליצור בו עניין מיוחד

מטרות

המטרה המרכזית של העבודה היא להוות כלי נוסף בידי המורה בכדי לשפר את רמת ההוראה בנושא הביקוע הגרעיני,

מעבר לכך העבודה תאפשר למורה לנגוע בהיבטים הערכיים הקשורים לתחומי המדע

וכן, תאפשר למורה להעביר את השיעור בצורה חווייתית יותר.

בכתיבת החומר התאורטי נעזרנו רבות בפרופ' קירסון, שהסביר את החומר וענה בסבלנות רבה על כל השאלות, ועל כך אנו מודים לו מקרב לב, וכן לד"ר חנה ברגר ולזהורית קפאח שהשקיעו מזמנן ומרצן כדי לרשום הערות לעבודה בתחום ההוראה.

ביקוע גרעיני

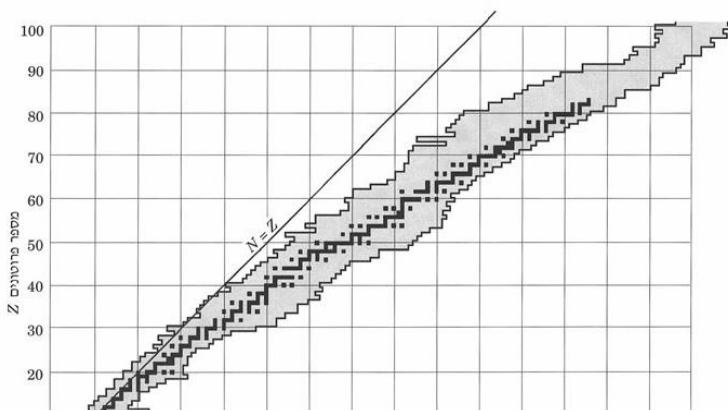
יציבות הגרעין

אנרגיית הקשר הגרעינית הינה האנרגיה שצריך להשקיע כדי לפרק את הגרעין לרכיביו. ככל שאנרגיה זו גבוהה יותר, כך הגרעין קשור יותר וככל שהיא נמוכה יותר, הגרעין פחות קשור. המעבר מגרעינים פחות קשורים לגרעינים יותר קשורים כרוך בשחרור של עודף אנרגיה, האנרגיה הרדיואקטיבית. למעשה, כל התפרקות רדיואקטיבית היא ביטוי למעבר מגרעין פחות קשור לגרעין יותר קשור. כשבוחנים את גודלה של אנרגיית הקשר לנוקלאון, ניתן לראות (ראה גרף 3) כי אנרגיה זו קבועה באופן מקורב, מלבד בשוליים בהם נמצאים הגרעינים הקלים ביותר והכבדים ביותר. עבור שניהם אנרגיית הקשר לנוקלאון נמוכה באופן יחסי. מכאן מתחייב, אפוא, כי ההתחברות של שני גרעינים קלים לגרעין כבד, מביאה להיווצרותו של גרעין יציב יותר ולשחרור אנרגיה, וכן פיצול של גרעין כבד לשני גרעינים קלים, מביאה להיווצרותם של גרעינים קשורים יותר ולשחרור אנרגיה.

קיימת נוסחת מסה המתארת באופן ברור את היחסים בין הכוח הגרעיני קצר הטווח לעומת הכח הקולוני ארוך הטווח. תוצאת המאבק בין שני כוחות אלה היא שעבור גרעינים כבדים, בעלי מספר נוקלאונים גדול, הכוחות הגרעיניים קצרי הטווח, הדואגים לשמירת הקשר בין נוקלאון לשכניו הקרובים, לא מספיק חזקים כדי להתחרות בהשפעתו של הכוח הקולוני הדואג להרחקתם זה מזה, ובמקום לקבל צורה כדורית, בהתאם לאנאלוגיה של מודל הטיפה, מאלץ את צורת הגרעין להיות קרוב לצורת האליפסואיד.

ניתן אם כן לראות מכאן, כי לא כל צירוף של N ניטרונים ו- Z פרוטונים יוצר גרעין קשור. ואכן יש בטבע איזוטפים רבים שהגרעינים שלהם לא יציבים, בגלל מספר לא מתאים של ניטרונים

ופרוטונים, וסיבות נוספות. גרעינים אלה מתפרקים באופן ספונטאני, והופכים לגרעינים אחרים תוך כדי פליטת חלקיקים אחרים. באיור 1 ניתן לראות את כל הגרעינים היציבים המצויים בטבע והגרעינים הרדיואקטיביים המוכרים לנו. הגרעינים היציבים מיוצגים ע"י ריבוע שחור, ואילו הגרעינים הלא יציבים מיוצגים ע"י השטח האפור.



גרף 1 גרעינים יציבים ולא יציבים

(באדיבות פרופ' מיכאל קירסון)

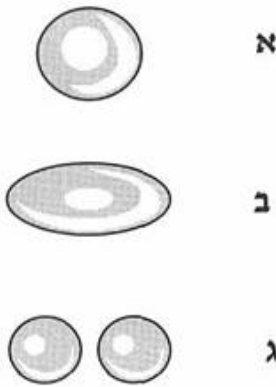
כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לש

בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה ללא מטרות אחרות, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

תהליך הביקוע הגרעיני

ביקוע גרעין הוא תהליך שבו מתבקע הגרעין לשני גרעינים קלים יותר, תוך כדי שחרור אנרגיה. ניתן להסביר את תהליך הביקוע באופן איכותי באמצעות מודל הטיפה, עליו נרחיב בפרק הבא.

לפי מודל הטיפה, יש אופני תנועה של החומר הגרעיני, בדומה לטיפת נוזל כדורי המושפעת ממתח פנים. אפשר לגרום לטיפת נוזל לבצע תנודות ולשנות את צורתה מכדור (איור א') לגוף מוארך (איור ב') וחוזר חלילה. הטיפה הנמצאת במצב מוארך עשויה להגיע למצב יציב יותר, בעל אנרגיה נמוכה יותר, אם תתפצל לשתי טיפות עגולות (איור ג'). את הביקוע הגרעיני ניתן להסביר בצורה דומה. כאשר גרעין כבד בולע אנרגיה ע"י בליעת ניטרון, אחת האפשרויות לשינוי הוא שיתחילו להיווצר תנודות בגרעין, הדומות לתנודות של טיפת הנוזל. הגרעין לובש צורת גוף מוארך הדומה לאליפסואיד, כוח המשיכה בין שני חלקי האליפסואיד נחלשים, בגלל מרחקם ההולך וגדל לעומת הכוח הגרעיני קצר הטווח הפועל עליהם, ודחייה קולונית קטנה. הגרעין מתקרב לאפשרות של הפרדה לשני



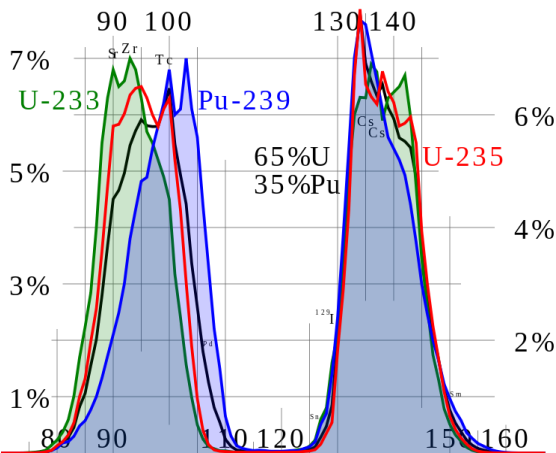
תרשים 1 באדיבות אתר ויקיפדיה ערך "ביקוע"

גרעינים קלים יותר. למרות זאת, האנרגיה שהתווספה ע"י הניטרון, מתפזרת בין הנוקלאונים ולכן, עדיין ישנה הסתברות להתרחשות של אחד משלושת התהליכים הבאים:

א. פליטת ניטרון – הניטרון מקבל באופן אקראי את כל האנרגיה שהתפזרה לנוקלאונים, ונפלט אל מחוץ לגרעין.

ב. פליטת γ – תוספת האנרגיה גרמה לגרעין להיות במצב מעורר. ע"י פליטת γ , חוזרת האנרגיה לרמה שהיתה לה לפני הבליעה.

ג. ביקוע – בגרעינים כבדים, היחס בין ניטרונים לפרוטונים גדול מאשר בגרעינים קלים יציבים, בעת ביקוע של גרעין כבד, נוצר עודף ניטרונים. התוצאה היא, שבעת ביקוע, משתחררים כמה ניטרונים חופשיים. ישנן אפשרויות רבות של תוצרי ההתפרקות, כלומר, קיים מגוון רחב של זוגות גרעינים היכולים להיווצר כתוצאה מהביקוע. ועם כל זאת, קיימת הסתברות גבוהה



תרשים 2 באדיבות אתר ויקיפדיה ערך "ביקוע".

התפלגות סטטיסטית של אורניום לתוצרי ביקוע.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מאוד שאחד מהתוצרים יהיה גרעין שמספר הנוקלאונים שלו קרוב ל-"מספרי הקסם", גרעינים אשר התגלו כבעלי יציבות גבוהה במיוחד.
(בפרק השלישי נאריך במודל הקליפות, המסביר את היווצרותם של מספרי הקסם).

תגובת שרשרת

כפי שראינו בסעיף הקודם, בכל ביקוע של גרעין ^{235}U נפלטים כמה ניטרונים. עובדה זו מאפשרת את התהליך המכונה **תגובת שרשרת** של ביקוע, שהיא הבסיס לפעולתם של כורים גרעיניים ופצצות אטום. בגוש של ^{235}U נקי, מתרחשים כמה ביקועים ספונטניים בכל שנייה. בכל ביקוע ספונטני משתחררים 2.5 ניטרונים חופשיים, בממוצע. אם ניטרונים אלה ייבלעו בגרעיני ^{235}U אחרים, הם יגרמו גם להם להתבקע, ולשחרר ניטרונים שיגרמו לביקועים נוספים, וחוזר חלילה. תהליך זה מכונה תגובת שרשרת של ביקוע. חומר שתהליך זה יכול להתחולל בו מכונה **חומר בקיע** או חומר בר-ביקוע.

כדי שתגובת שרשרת תוכל להתחולל בחומר, צריכים להתקיים התנאים הבאים:

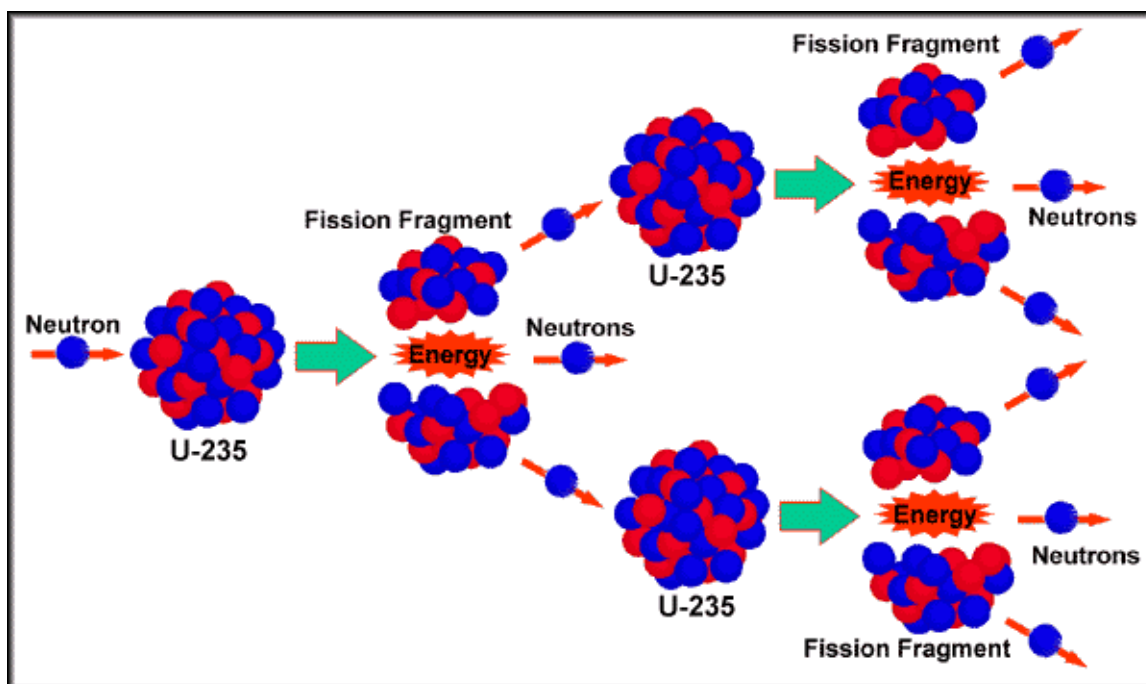
- א. בליעת ניטרון בגרעין צריכה לגרום, בהסתברות גבוהה, לביקוע המיידי.
 - ב. בכל ביקוע צריכים להיווצר מספר ניטרונים חופשיים, באנרגיה המתאימה לביקוע גרעינים נוספים.
 - ג. ההסתברות שניטרון שהשתחרר בתהליך ביקוע הגרעין ופגע בגרעין אחר, ייבלע בו, צריכה להיות מספיק גבוהה.
- שלושה איזוטופים שבהם התנאים האלה מתקיימים הם: אורניום-235, אורניום-233, ופלוטוניום-239. אורניום-235 נמצא בטבע, בשיעור 0.7% מהאורניום הטבעי. פלוטוניום-239 אינו נמצא בטבע, אך הוא נוצר בכורים כאשר ^{238}U בולע ניטרונים גם אורניום-233 אינו נמצא כמעט בטבע. תנאי הכרחי נוסף להתפתחות תגובת שרשרת בגוש של חומר בקיע הוא, שמסת הגוש תהיה גדולה דיה. הניטרון מסוגל לעבור מרחק גדול יחסית בחומר בלי להילכד בגרעין. במסה קטנה רוב הניטרונים יצאו מן החומר בלי לגרום לביקועים.

המסה המינימלית של חומר בקיע, הדרושה לקיום תגובת שרשרת, מכונה המסה הקריטית. מסה קטנה מן המסה הקריטית מכונה מסה תת-קריטית, ומסה גדולה ממנה מכונה מסה על-קריטית. במסה קריטית של חומר בקיע, כל ביקוע גורם, בממוצע לביקוע נוסף אחד. קצב הביקועים קבוע, וכן קצב שחרור האנרגיה. לעומת זאת, בגוש של מסה על-קריטית, כל ביקוע יגרום, בממוצע, ליותר מביקוע אחד, וקצב שחרור האנרגיה יגדל במהירות.

פצצת אטום היא פצצה גרעינית המבוססת על תגובת שרשרת באורניום-235 או פלוטוניום-239. ברגע הרצוי, גורמים לפיצוץ על-ידי צירוף של שתי מסות תת-קריטיות (או יותר) למסה על-קריטית אחת, או על-ידי הגדלת צפיפות החומר, בעזרת פיצוץ פנימה של מעטה מתכת חיצוני.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

אפשר לבנות פצה גם מאורניום מועשר, כלומר מאורניום טבעי שאחוז האיזוטופ-235 שבו הוגדל, אלא שהדבר מצריך הגדלת המסה הקריטית.



איור 3 – תרשים גרפי המתאר את תגובת השרשרת. התרשים באדיבות אתר ויקיפדיה ערך "ביקוע".

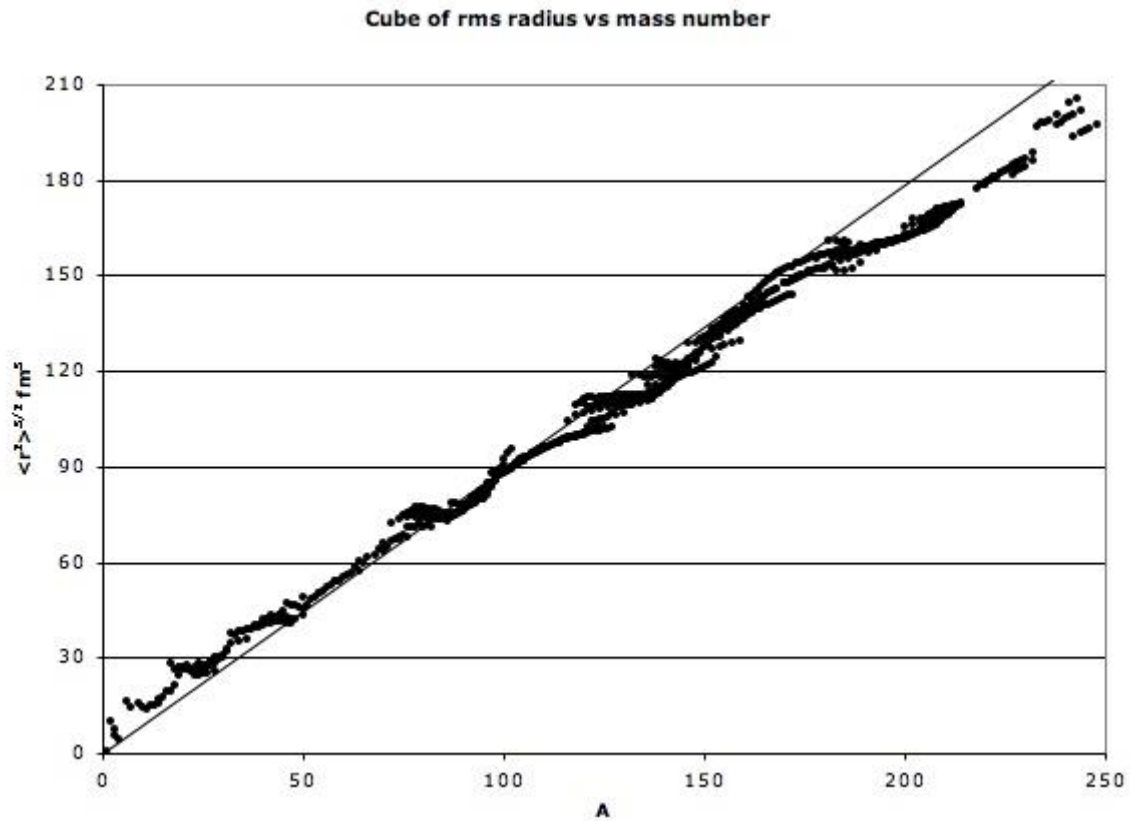
כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מודל הטיפה

הנוסחה הסמי אמפירית

התיאור הפשוט ביותר של מבנה הגרעין שניתן לפתח, הינו מודל שבו הנוקלאונים מתנהגים כמו טיפה רציפה של חומר גרעיני, כך שניתן להתייחס אליהם כאל טיפת נוזל בהידרודינמיקה קלאסית. במודל זה אנו מתעלמים מהתכונות הקוונטיות של הנוקלאונים. כשם שישנם כוחות משיכה בין מולקולות הטיפה (כוחות ואן דר ואלס), כך בהתאמה ישנם כוחות משיכה גרעיניים בין הנוקלאונים כאשר בשני המקרים מדובר בכוחות קצרי טווח. כדי לאפשר שימוש במודל נדרשים אנו למסקנות העולות מתוצאות של ניסויים רבים. הקושי בהגדרת נפח הגרעין נובע מהעובדה, שלגרעין אין שטח פנים חד, אלא צפיפות נוקלאונים היורדת בהדרגה לאפס, כפי שמודגם ע"י גרף 8. הצפיפות במרכז היא אחידה לכל הגרעינים, חוץ מן הקלים ביותר. רדיוס RMS הוא גודל מוגדר היטב, המאפיין את ממדיו הקוויים של הגרעין. החזקה השלישית שלו, היא מדד לנפח שלו, לכן גרף 2 מציג את העובדה שנפח הגרעין הוא בקרוב פרופורציוני ל³A.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

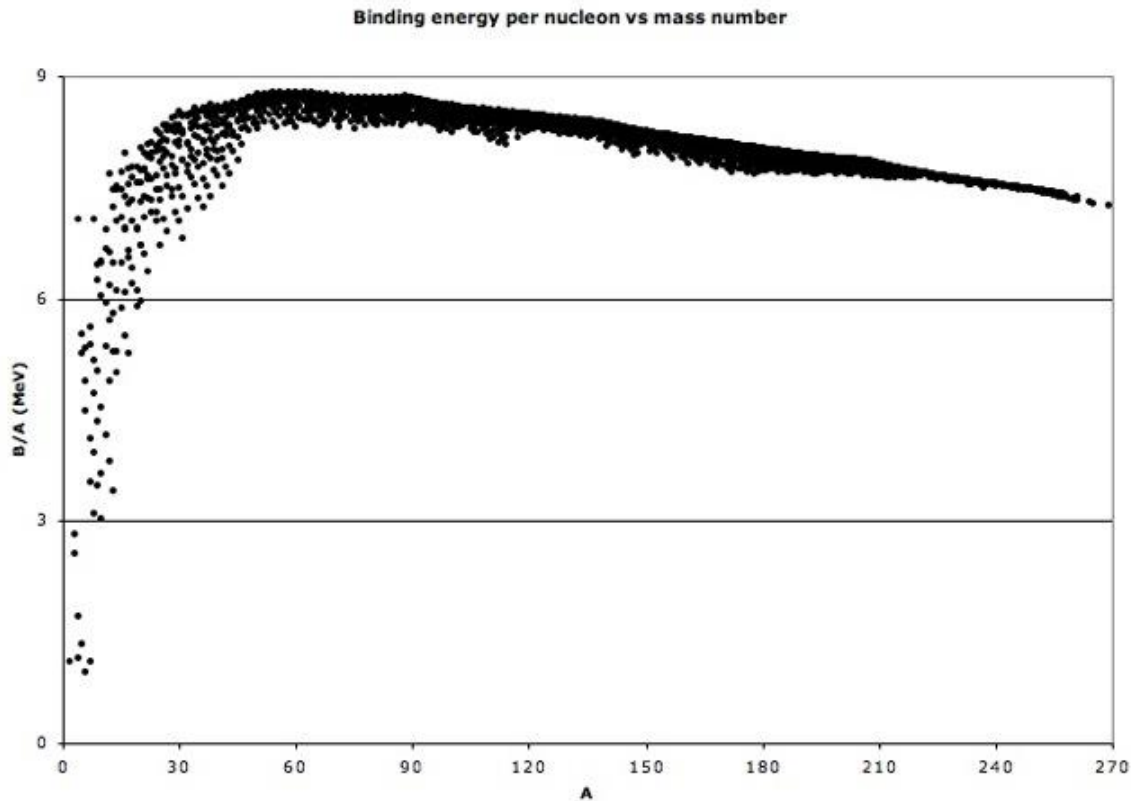


גרף 2 באדיבות פרופסור מיכאל קירסון

גרף 2

אם נתבונן בגרף 3 המבטא את אנרגיית הקשר לנוקלאון כתלות במספר הנוקלאונים, הגרף 'מזמין' לנסות להתאים לו פונקציה לינארית, כאשר האיבר הראשון יהיה המשמעותי, והאיברים הבאים יהיו תיקונים מסדרים הולכים וקטנים.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



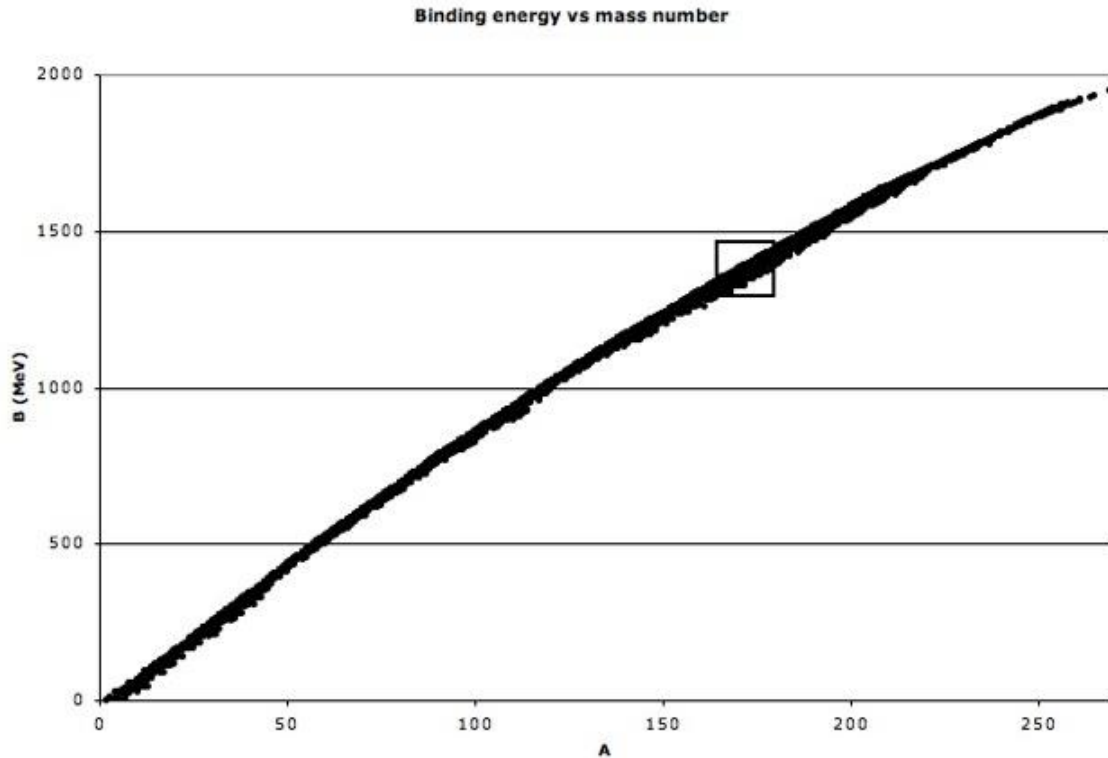
גרף 3 באדיבות פרופסור מיכאל קירסון

א] בהסתכלות ראשונית בגרף של אנרגיית הקשר כתלות במספר הנוקלאונים, (גרף 4) נראה גרף לינארי, מה שמוביל למסקנה שכנראה אנרגיית הקשר פרופורציונית למספר הנוקלאונים. נראה כי אנרגיית הקשר הגרעינית מתקבלת כתוצאה מהאינטרקציה של כל אחד מהנוקלאונים עם השכנים הקרובים אליו. אינטרקציה זו נובעת, כמובן, מהכוח הגרעיני החזק. ברור מכאן שככל שמספר הנוקלאונים גדל, כך גדלה גם אנרגיית הקשר. ניתן לבטא זאת באופן הבא:

$$B = \alpha_p A$$

כלומר, אנרגיית הקשר נמצאת ביחס ישר למספר הנוקלאונים, כאשר מקדם הפרופורציה הינו α_p .

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



גרף 4 באדיבות פרופסור מיכאל קירסון 1

גרף 4

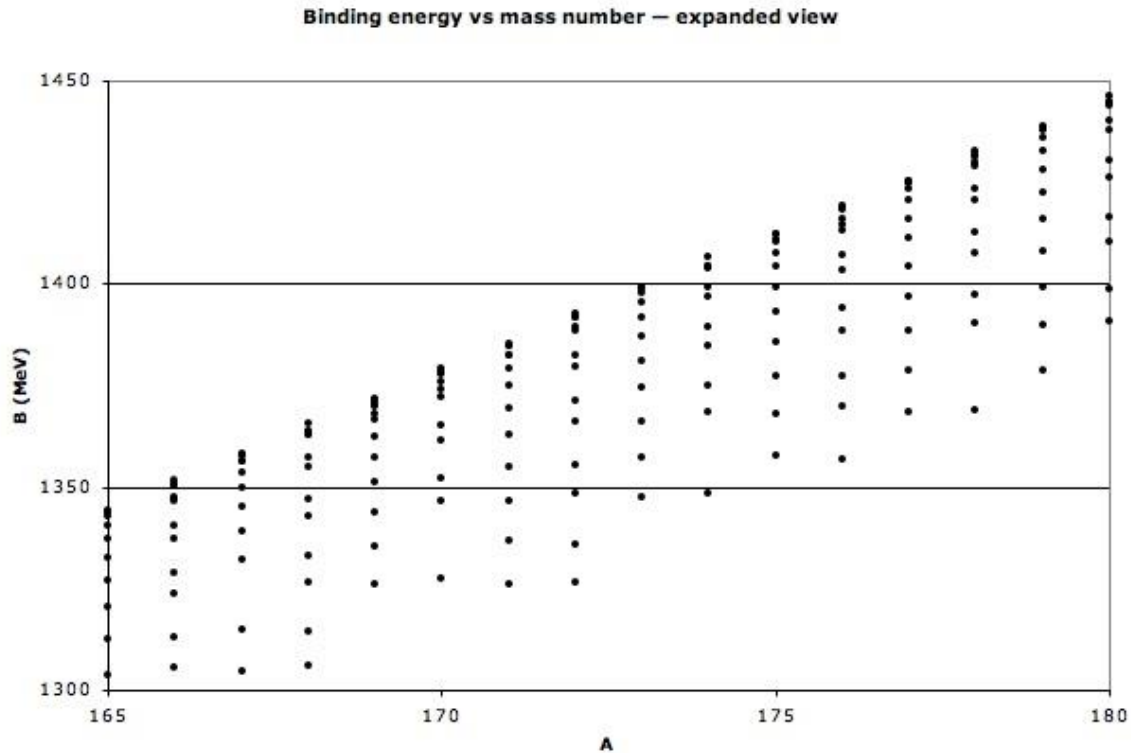
ב] בביטוי שכתבנו עד כה, נראה שלכל נוקלאון יש אותו מספר שכנים איתם הוא יוצר אינטראקציה. עובדה זו לא נכונה שהרי לנוקלאונים שבקצות הגרעין יש רק אינטראקציות כלפי פנים. התיקון הראשון לכן קשור לעובדה שלנוקלאונים הנמצאים בקליפת הגרעין, אין כל אינטראקציה עם הסביבה שמחוץ לגרעין. היחס הישר בין אנרגיית הקשר לבין מספר הנוקלאונים יכול להיות מתורגם גם ליחס ישר בין אנרגיית הקשר לבין נפח הגרעין, בהתאם למה שנראה בגרף 2. ואם כן, נודקק כעת להתייחס לעובדה שיש איבוד אנרגיית קשר על פני הגרעין. לשם כך נחסר איבר המבטא את שטח הפנים הדליל באינטראקציות. שנראה כך:

$$\alpha_s A^{2/3}$$

ומכאן נקבל את אנרגיית הקשר עד לאיבר השני:

$$B = \alpha_v A - \alpha_s A^{2/3}$$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



גרף 5 באדיבות פרופסור מיכאל קירסון 1

ג] הגרף [גרף 5] מראה שיש לקו רוחב המתקבל ע"י האיזוברים (מספר נתון של נוקלאונים, שינוי במספר הניוטרונים ופרוטונים נותן אנרגיות קשר שונות. סעיפים א] וב] לא נותנים ביטוי למספר ניוטרונים או פרוטונים אלא רק למספר הנוקלאונים, ולכן חייב להיות איבר נוסף שיתייחס לפרמטר הזה גם כן. הכח המתבקש הוא הכח הקולוני, שתלוי במספר הפרוטונים Z . כח זה מוריד את אנרגיית הקשר שהרי הוא כח של דחייה. אנחנו יודעים שהוא, פורפורציוני למטען בריבוע חלקי הרדיוס. אמנם הכוח הקולוני חלש בהרבה מהכח החזק, אך יחד עם זאת, עבור גרעינים רבי נוקלאונים ניכרת השפעתו, כי Z בריבוע גדל הרבה יותר מהר מ A , וכמו כן הוא ארוך טווח יחסית לכח החזק.

רווח נוסף מהוספת האיבר הקולוני הוא שבגרף אנרגיית הקשר כפונקציה של מספר הנוקלאונים (גרף 1) ניתן לראות כי בערך $A=30$ ישנה נקודת מקסימום שממנה והלאה נפסקת התלות הליניארית ומתחילה ירידה הדרגתית הנובעת בעיקר מהגדלת ערכה של האנרגיה הקולונית כתוצאה מעליית מספר הנוקלאונים.

האנרגיה הקולונית במקרה זה מקיימת

$$E_c \propto \frac{z^2}{A^{1/3}}$$

ומכאן ניתן לקבל את אנרגיית הקשר עד האיבר השלישי:

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$$B = \alpha_v A - \alpha_s A^{2/3} - \alpha_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

[ד] הנוסחה לאנרגיית הקשר שקיבלנו עד כה, אינה מאפשרת, למעשה, קיומם של פרוטונים בגרעין, שכן קיום זה בא בסתירה לעקרון מינימום האנרגיה. ולמרות זאת, כל הגרעינים הנמצאים בטבע מורכבים כמובן גם מפרוטונים. לשם כך צריך להוסיף איבר רביעי שייתן עדיפות לקשר פרוטון – נויטרון על פני 2 הקשרים האחרים של שני נוקלאונים. הימצאותם של פרוטונים נובעת מכך שהקשר בין נויטרון פרוטון הוא חזק יותר מקשר נויטרון נויטרון או פרוטון פרוטון. מקסימום הקשרים בין נויטרון ופרוטון יוסג כאשר מספרם שווה זה לזה. האיבר הרביעי יהיה פרופורציוני למספר הניטרונים פחות מספר הפרוטונים בריבוע חלקי מספר הנוקלאונים. אפשר להראות כי לכך קצר הטווח, התרומה לאנרגיה פרופורציונית הופכית לנפח, ולכן לא.

ומכאן ניתן לקבל את נוסחת אנרגיית הקשר עד ארבעה איברים שנראית כך :

$$B = \alpha_v A - \alpha_s A^{2/3} - \alpha_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \alpha_t \frac{(N - Z)^2}{A}$$

הגדלים המתקבלים מהתאמת הנוסחה לאוסף האטומים שנמדדו (ביחידות של MeV)

$$\alpha_v = 15.56$$

$$\alpha_s = 17.23$$

$$\alpha_c = 0.697$$

$$\alpha_t = 93.14$$

הנוסחה הזו נכתבה בשנת 1935, והיא נותנת קירוב טוב למסה של הגרעינים כתלות במספר הפרוטונים והניוטונים.

בהינתן הנוסחה הזו ניתן לחשב את האנרגיה הדרושה להוצאת נויטרון אחד מתוך הגרעין –

האנרגיה –

$$S_n = [M(Z, A - 1) + m_n - M(Z, A)] c^2 = B(Z, A) - B(Z, A - 1)$$

וכאשר מנסים להוציא פרוטון – האנרגיה במקרה הזה –

$$S_p = [M(Z - 1, A - 1) + m_p + m_e - M(Z, A)] c^2 = B(Z, A) - B(Z - 1, A - 1) + m_e c^2$$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

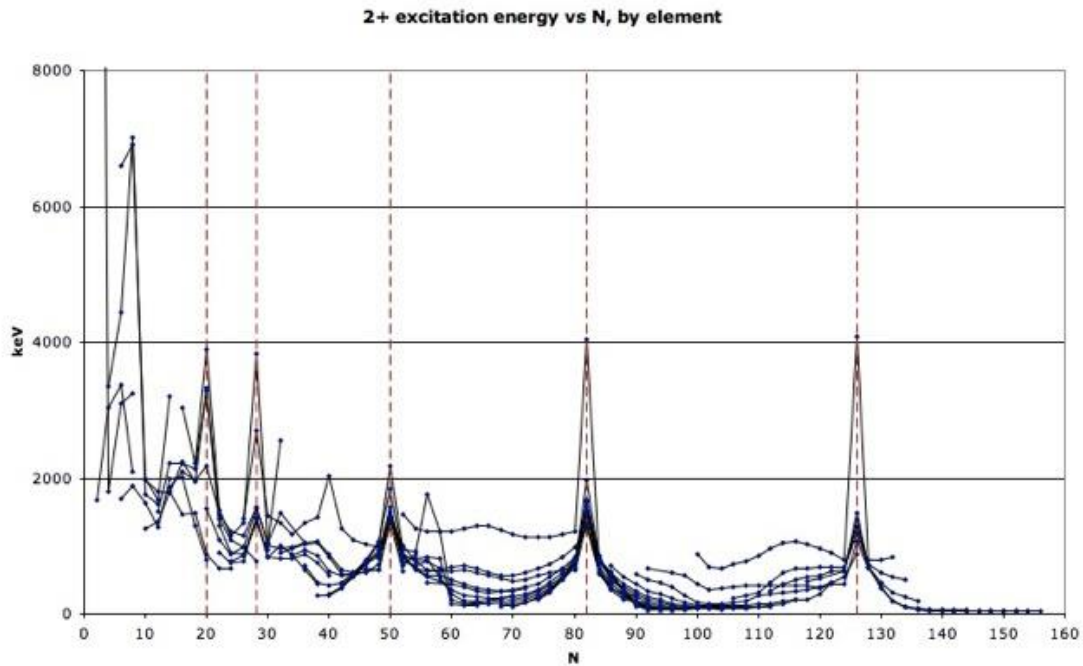
בפועל שני הביטויים האלו יכולים להיות מאד שונים (האנרגיה הדרושה להוציא נויטרון או פרוטון עשויות להיות שונות משמעותית), וקשה לראות את זה מתוך המודל. הסיבה היא שאנחנו בנינו מודל שמתייחס ל"גוש" של נוקלאונים, בעוד הנוקלאונים מסודרים ב"קליפות" של אנרגיה. אם אין סימטריה בין מספר הפרוטונים ונויטרונים ניתן לצפות שיהיה הבדל משמעותי בין שליפת פרוטון (למשל) מקליפה חיצונית לבין שליפת נויטרון (פרוטון) מקליפה פנימית יחסית.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מספרי קסם

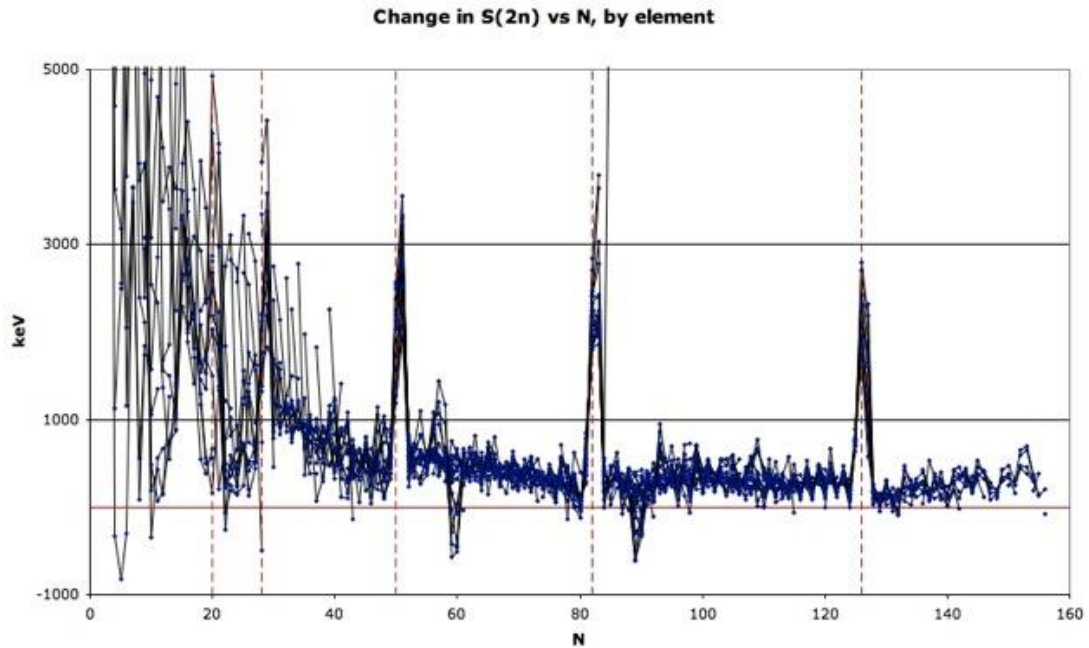
הפערים שבין הנוסחה הסמי אמפירית לתוצאות המדידה

קיימת אי התאמה בין הנוסחה הסמי אמפירית לבין הניסיון בפועל, מודל הטיפה מתאר היטב את עיוות הגרעין וביקועו, אולם עפ"י מודל הטיפה אנרגיית הקשר תלויה באופן רציף במספר הנוקליאונים בגרעין, הניסיון בפועל מראה אי רציפות. [ראה גרף 6, 7] בתלות זו סביב מספרי הנוקליאונים : 2 8 20 28 50..... מספרים אלו מכונים מספרי הקסם.



גרף 6 באדיבות פרופסור מיכאל קירסון 1

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



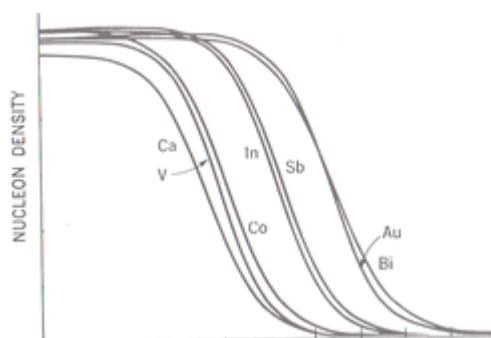
גרף 7 באדיבות פרופסור מיכאל קירסון 1

מודל הקליפות

אי הרציפות באנרגיית הקשר הובילו למודל הקליפות בגרעין בדומה למודל הקליפות במודל האטום.

מודל הקליפות פותח ע"י מאייר וג'נסן (mayer and jensen), מודל הקליפות זיכה אותם בשנת 1963 בפרס נובל.

צפיפות המסה בגרעין אחידה בקירוב במרכזו וקטנה באופן אקספוננציאלי בסמוך לשולי הגרעין, בגרף הבא מתוארים באופן איכותי צפיפויות המסה של גרעינים שונים.



גרף 8

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

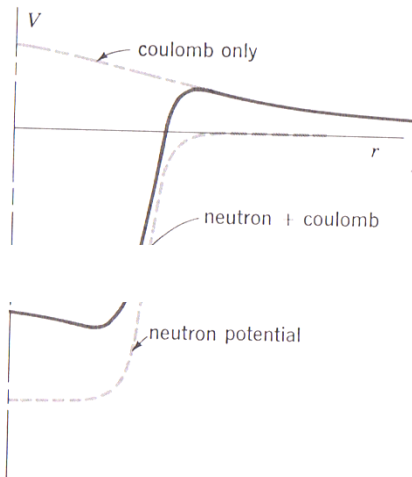
בעזרת צפיפות הנוקליאונים בגרעין ניתן להגדיר את פוטנציאל הכוח הגרעיני של כל הגרעין $U(r)$, לפי:

$$U(\vec{r}) = \int V(\vec{r}, \vec{r}') \rho(\vec{r}') d\vec{r}'$$

כאשר, הפונקציה V מתארת את הפוטנציאל הגרעיני בין כל שני נוקליאונים בודדים בגרעין.

חוץ מהכוח הגרעיני בין הנוקליאונים פועל גם כוח חשמלי. הכוח החשמלי פועל ככוח דחייה (פוטנציאל חיובי) והכוח הגרעיני פועל ככוח משיכה (פוטנציאל שלילי). סכום הפוטנציאלים של הכוח הגרעיני ושל הכוח החשמלי הוא הפוטנציאל הכללי של הגרעין.

בגרף 9 מתוארים הפוטנציאלים של הכוח הגרעיני והחשמלי, והפוטנציאל המשוקלל



בשלב זה, נזניח את הפוטנציאל החשמלי ונתייחס רק לפוטנציאל הגרעיני. החלק הקבוע בגרף של הנויטרון ללא הכח הקולומבי נובע מכך שבתוך הגרעין הנוקלאון לא מרגיש כח נטו כי כל הכוחות סימטריים. לא גרף 9 קיים פתרון אנליטי לפוטנציאל הגרעיני כפי שהוא במשוואת שרדינגר. מכיוון שבפועל הרמות המאוישות הן מתחת לאפס, ניתן בקירוב ראשון להתייחס לבור, כבור ריבועי אינסופי.

לבור פוטנציאל אין סופי קיים פתרון אנליטי במשוואת שרדינגר, לכן נתייחס לפוטנציאל זה כקירוב ראשון.

פתרונות משוואת שרדינגר עבור בור פוטנציאל ריבועי הם אוסף הנקודות שבהם מתאפסות פונקציות בסל הכדוריות. (landau and lifshitz, quantum mechanics, chapter 33, problem)

פונקציות בסל הכדוריות הן אוסף של פונקציות, המוגדרות לפי:

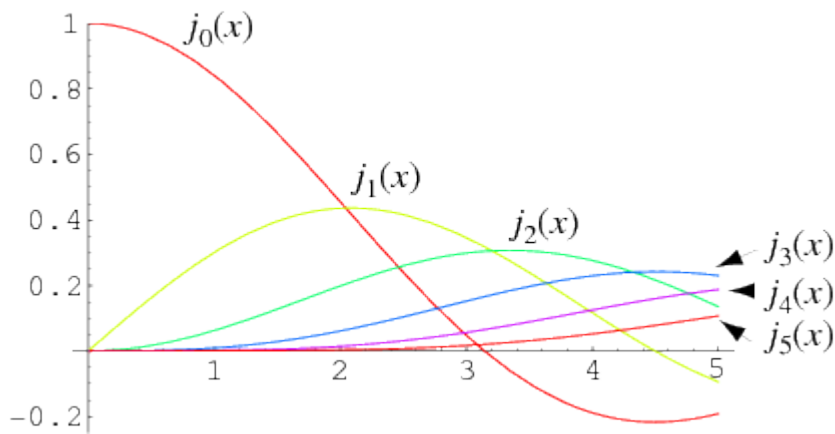
$$j_n(z) = (-1)^n z^n \left(\frac{d}{z dz} \right)^n \frac{\sin z}{z}$$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

נכתוב את הפונקציות הראשונות באופן מפורש :

$$\begin{aligned}
 j_0(z) &= \frac{\sin z}{z} \\
 j_1(z) &= \frac{\sin z}{z^2} - \frac{\cos z}{z} \\
 j_2(z) &= \left(\frac{3}{z^3} - \frac{1}{z}\right) \sin z - \frac{3}{z^2} \cos z,
 \end{aligned}$$

נתאר את הפונקציות באופן גרפי :



גרף 9

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

נכתוב בצורה מפורשת את אוסף הנקודות בהן מתאפסות פונקציות בסל :

$$j_0(k_0 R) = \frac{\sin(k_0 R)}{k_0 R} = 0 \quad k_0 R = \pi, 2\pi, 3\pi \dots$$

$$j_1(k_1 R) = \frac{\sin(k_1 R)}{(k_1 R)^2} - \frac{\cos(k_1 R)}{k_1 R} = 0 \quad k_1 R \approx 1.430\pi, 2.549\pi, 3.467\pi \dots$$

$$j_2(k_2 R) = \frac{3\sin(k_2 R)}{(k_2 R)^3} - \frac{3\cos(k_2 R)}{(k_2 R)^2} - \frac{\sin(k_2 R)}{k_2 R} = 0 \quad k_2 R \approx 1.835\pi, 2.895\pi, 3.923\pi \dots$$

רמת אנרגיה מנוונות בתלות בערכו של ℓ לפי $2(2\ell + 1)$. (כולל ספין).

האנרגיה תלויה ברוחב הבור והיא פרופורציונית הופכית לרוחב הבור בריבוע

לפי עיקרון פאולי לכל נוקלאון המאוכלס בגרעין יש מצב קוואנטי שונה המאופיין ע"י ארבעה מספרים קוואנטים.

n – המספר הקוואנטי הראשי, קובע את האנרגיה של כל מצב קוואנטי. מקבל ערכים

חיוביים, n במצב קוואנטי מסוים מוגדר לפי מספר הפעמים הקודמים בהם הופיע ℓ של אותו מספר קוואנטי.

ℓ – המספר הקוואנטי של המומנט הזוויתי, נקרא גם תנע מסילתי. הוא מקבל ערכים חיוביים, יכול לקבל אפס.

m – המספר הקוואנטי המגנטי, מוגדר כהיטל של ℓ על ציר ה Z .

$$m = -\ell, -(L-1), \dots, 0, \dots, \ell-1, \ell$$

ms – מספר קוואנטי נוסף הספין, הנוקלאונים הם פרמיונים, מבחינה קוואנטית יש להם דרגת חופש פנימית דו ערכית

מקובל לסמן את המספר הקוואנטי ℓ :

$$\ell = 0 \rightarrow s$$

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$l = 1 \rightarrow p$

$l = 2 \rightarrow d$

$l = 3 \rightarrow f$

$l = 4 \rightarrow g$

$l = 5 \rightarrow h$

נתאר את ספקטרום פוטנציאל הבור הריבועי :

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

3-D square well

$3s$	_____	2 [198]
$2d$	_____	10 [196]
$1g$	_____	18 [186]
$0j$	=====	30 [168]
$2p$	_____	6 [138]
$0i$	_____	26 [132]
$1f$	_____	14 [106]
$2s$	=====	2 [92]
$0h$	=====	22 [90]
$1d$	_____	10 [68]
$0g$	_____	18 [58]
$1p$	_____	6 [40]
$0f$	_____	14 [34]
$1s$	_____	2 [20]
$0d$	_____	10 [18]
$0p$	_____	6 [8]
$0s$	_____	2 [2]

התרשים באדיבות פרופסור מיכאל קירסון 1

הסימון משמאל מתאר את l ו- n . המספר מימין בתוך הסוגריים מתאר את סך כל האכלוסי הנוקליאוניים עד לרמה הנוכחית. המספר מחוץ לסוגריים מתאר את מספר האכלוסים ברמה הנוכחית.

המרחק בין רמות האנרגיה לא קבוע, אם נתייחס למספרי הקסם לפי הקפיצות הגדולות בספקטרום, שהרי קפיצה גדולה מעידה על מילוי של קליפה בגרעין ומעבר לקליפה הבאה דורשת קפיצת אנרגיה. נקבל: **2,8,20,34,58,92,138,186**

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מספרי הקסם הנצפים הם : 2,8,20,28,50,82,126, ואם כן עדיין יש פער בין הקירוב שעשינו למציאות.

כדי לבצע קירוב נוסף, נתייחס לבור פוטנציאל הרמוני. שילוב של הבור ההרמוני יוכל לתת קירוב טוב יותר למקומות סביב שפת הבור. לפוטנציאל ההרמוני יש פתרון אנליטי במשוואת שרדינגר.

N מסמן את רמת האנרגיה. לכל N יש מספר אפשרויות ל : n ו l . הקשר עם l, n הוא $2n+l=N$ וכל l, n חיוביים ושלמים, המקיימים קשר זה מגדירים רמת אנרגיה מנוונת.

המספרים הקוואנטיים הם מספרים שלמים, לכן אם N הוא אי זוגי גם l הוא אי זוגי, וכך אם N הוא זוגי גם l הוא זוגי.

המספר הקוואנטי N יכול לקבל את כל אוסף הערכים הבדידים : $0,1,2,3,4, \dots$

כל ערך בדיד של N קובע את רמת האנרגיה של הנוקלאון בבור הפוטנציאל ההרמוני.

לדוגמה ברמה $N=4$: $l=4, n=0$ או $l=2, n=1$ או $l=0, n=2$

הספקטרום המתקבל עבור הפוטנציאל ההרמוני :

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

oscillator

$3p, 2f, 1h, 0j$ _____ 72 [240]

$3s, 2d, 1g, 0i$ _____ 56 [168]

$2p, 1f, 0h$ _____ 42 [112]

$2s, 1d, 0g$ _____ 30 [70]

$1p, 0f$ _____ 20 [40]

$1s, 0d$ _____ 12 [20]

$0p$ _____ 6 [8]

$0s$ _____ 2 [2]

התרשים באדיבות פרופסור מיכאל קירסון 2

בניגוד לבור פוטנציאל ריבועי, כאן המרחק בין כל רמת אנרגיה הוא מרחק קבוע. בבור הריבועי יש פחות ניוונים. הניוונים בפוטנציאל ההרמוני "נפרסים" ברמות נפרדות בבור הפוטנציאל הריבועי.

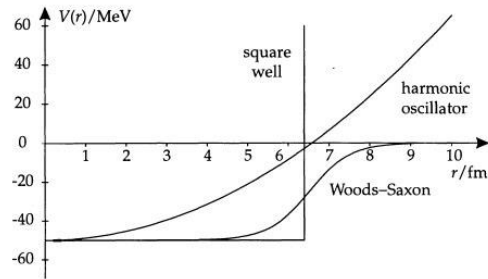
אם נתייחס לקפיצה בין רמה לרמה כמספר קסם. נקבל את מספרי הקסם:
2,8,20,40,70,112,168

מספרי הקסם הנצפים הם, כאמור: 2,8,20,28,50,82,126

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הפער בין מספרי הקסם המתקבלים במציאות למספרים המתקבלים במודל הקליפות נובע מהעובדה שהפוטנציאל הגרעיני לא זהה לחלוטין לפוטנציאל ההרמוני וגם לא לפוטנציאל הריבועי.

הגרף הבא מתאר את הפוטנציאל ההרמוני והריבועי יחד עם פוטנציאל הגרעין עבור גרעין ^{208}Pb



מהשוואת הספקטרום של הפוטנציאל הריבועי והספקטרום של הפוטנציאל ההרמוני ניתן לראות שלכל רמה בפוטנציאל ההרמוני קיימת רמת אנרגיה בעלי n זהים, בפוטנציאל הריבועי.

הרמות המנוונות של הפוטנציאל ההרמוני מתפצלות ונפרשות בסמיכות בפוטנציאל הריבועי ללא ניוון.

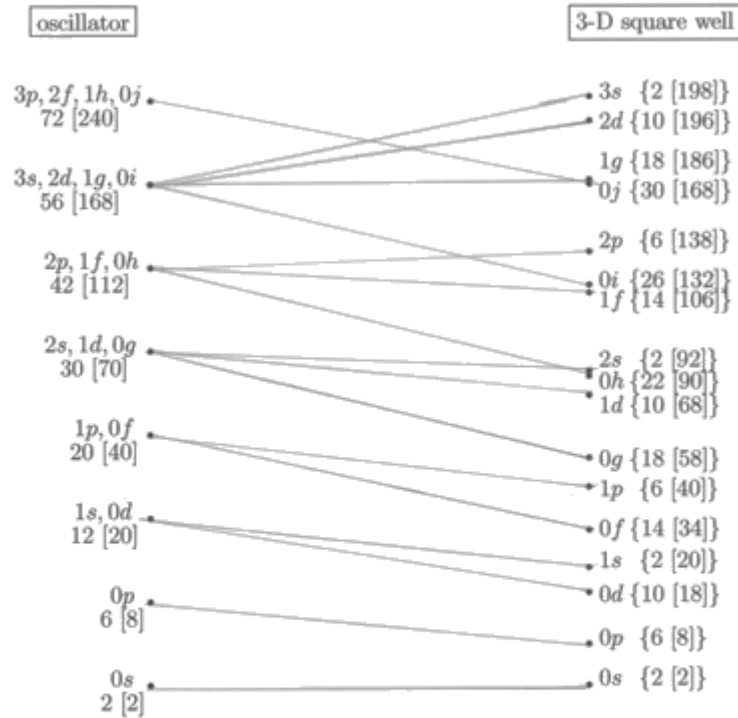
פרישת הרמות בפוטנציאל הריבועי נקבעת בהתאם ל ערכו של ℓ , ככל שערכו גדול יותר כך הרמה תמוקם באנרגיה נמוכה יותר.

הפערים בין הרמות של בור הפוטנציאל הריבועי לא מתאימים למספרי הקסם, גם אם תוזנה הרמות במעט.

אם נעשה מיצוע בין שתי הבורות נקבל :

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

Interpolated single-particle potential well



The number of particles accommodated by each energy level is noted next to or below the label $n\ell$ of the level, with the cumulative total number of particles from the lowest level upwards indicated in square brackets. Oscillator levels are connected to square-well levels of the same $n\ell$ by straight lines. Any vertical line between the dots representing the energy levels defines a linear interpolation between the two sets of levels. The levels displayed in the magic number discussion lie half-way between the dots.

התרשים באדיבות פרופסור מיכאל קירסון

כדי לקבל את מספרי הקסם נתייחס לאפקט האינטראקציה ספין מסילה $l \cdot s$.

באלקטרומגנטיות קיימת אינטראקציה מגנטית בין השדה המגנטי הנוצר כתוצאה מתנועתו האורביטאלית של המטען ובין השדה המגנטי הנוצר כתוצאה מתנועת המטען סביב צירו.

לנוקלאונים בגרעין קיים תנע מסילתי ותנע עצמי – ספין. האינטראקציה ביניהם באנלוגיה לאלקטרומגנטיות משפיעה על רמות האנרגיה בספקטרום האנרגיה של הגרעין.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הספקטרומים הבאים מתארים את רמות האנרגיה בהתייחס לאינטראקציה ספין מסילה. קיום אינטראקציית ספין-מסילה לחלקיקים בעלי ספין 1/2 גורם לפיצול רמה בעלת | נתון לשתי רמות בעלות תנע זוויתי המסומן בן השווה ל | עם ספין חיובי או שלילי. הרמות לאחר השפעת אינטראקציית ספין-מסילה מתרחקות זו מזו.

$+\vec{\ell} \cdot \vec{s}$		$-\vec{\ell} \cdot \vec{s}$	
$0j_{15/2}$	16 [198]	$0j_{13/2}$	14 [198]
$3s_{1/2}$	2 [182]	$2d_{3/2}$	4 [184]
$2d_{5/2}$	6 [180]	$3s_{1/2}$	2 [180]
$1g_{9/2}$	[182]	$1g_{7/2}$	8 [178]
$2d_{3/2}$	4 [164]	$2d_{5/2}$	6 [170]
$0j_{13/2}$	14 [160]	$0j_{15/2}$	16 [164]
$0i_{13/2}$	14 [146]	$0i_{11/2}$	12 [148]
$1g_{7/2}$	8 [132]	$1g_{9/2}$	10 [136]
$2p_{3/2}$	4 [124]	$2p_{1/2}$	2 [126]
$1f_{7/2}$	8 [120]	$1f_{5/2}$	6 [124]
$0i_{11/2}$	12 [112]	$0i_{13/2}$	14 [118]
$2p_{1/2}$	2 [100]	$2p_{3/2}$	4 [104]
$0h_{11/2}$	12 [98]	$0h_{9/2}$	10 [100]
$1f_{5/2}$	6 [86]	$1f_{7/2}$	8 [90]
$0h_{9/2}$	[80]	$0h_{11/2}$	[82]
$2s_{1/2}$	2 [70]	$1d_{3/2}$	4 [70]
$1d_{5/2}$	6 [68]	$2s_{1/2}$	2 [66]
$0g_{9/2}$	10 [62]	$0g_{7/2}$	8 [64]
$1d_{3/2}$	4 [52]	$1d_{5/2}$	6 [56]
$0g_{7/2}$	[48]	$0g_{9/2}$	10 [50]
$1p_{3/2}$	4 [40]	$1p_{1/2}$	2 [40]
$0f_{7/2}$	8 [36]	$0f_{5/2}$	6 [38]
$1p_{1/2}$	[26]	$1p_{3/2}$	[28]
$0f_{5/2}$	6 [26]	$0f_{7/2}$	8 [28]
$1s_{1/2}$	[20]	$0d_{3/2}$	[20]
$0d_{5/2}$	6 [18]	$1s_{1/2}$	2 [16]
$0d_{3/2}$	4 [12]	$0d_{5/2}$	6 [14]
	[8]		[8]
$0p_{3/2}$	4 [8]	$0p_{1/2}$	2 [8]
$0p_{1/2}$	2 [4]	$0p_{3/2}$	4 [6]
	[2]		[2]
$0s_{1/2}$	2 [2]	$0s_{1/2}$	2 [2]

התרשים באדיבות פרופסור מיכאל קירסון

חלק מהרמות צופפו כדי שהתרשים יהיה מובן יותר, וניתן יהיה להבחין בפערי האנרגיה בהתייחסות למספרי הקסם.

מהספקטרום הימני המתאים ל $-\vec{\ell} \cdot \vec{s}$ ניתן לראות בבירור שהמרחק בין רמות האנרגיה מתאים בדיוק למספרי הקסם: **2,8,20,28,50,82,126,184**

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הקפיצות באנרגיה במספרי הקסם משפיע על תוצרי הביקוע הגרעיני.

כלי הוראה

דילמות מוסריות בנושא הגרעין

רקע

יחידה זו נועדה להוות כלי בידי המורה, הנותן אפשרות לשלב את נושא הדילמות המוסריות במסגרת תוכנית הלימודים לבגרות בפיזיקה. למעשה, היחידה יכולה לשמש אף עבור כיתות חסרות רקע פיזיקלי, בהנחה שהמורה יכול להקנות בסיס פיזיקלי קצר אך מספק בתור הקדמה.

הדילמות המוסריות מלוות את האנושות ואת התפתחותה המדעית לאורך כל ההיסטוריה. הכלים העוצמתיים שנותן המדע בידי מדינות וכן בידי האזרח הפשוט, מחייבים התייחסות להשלכות כתוצאה מהשימוש בהם. למעשה, גם בתוכנית הלימודים קיימת התייחסות לדילמות אלו (אתר מפמ"ר הפיזיקה, 2012), אך נוצר מצב שלמעשה, עקב מורכבותה ונפחה של תוכנית הלימודים, מורים לא מספיקים להגיע לרעיונות אלה, וכמו כן, אין להם את בסיסי הידע הרלוונטיים המאפשרים להעבירם בכיתה.

ההצגה הסטרילית של הפיזיקה, כפי שהיא מוצגת היום, בצד המדעי שלה בלבד, מעוררת את השאלה האם ראוי להתמודד עם נושא הדילמות המוסריות כחלק מהמסגרת של תוכנית הלימודים בפיזיקה, או להעביר אותו לתחום האחריות של המחנך במסגרת שיעורי חינוך. אין בכוננתנו לנסות לענות על שאלה זו שכן היא קשורה גם למבנה בית הספר, הקשר מורה – מחנך והגישה של כל אחד מהמורים בפני עצמו, אלא המטרה העומדת לנגד עינינו היא הצגת הדילמות כמות שהן, ובכך לתת אפשרות לכל אחד מהגורמים הרלוונטיים להתייחס אליהם או לבנותם כמערך שיעור.

יחידת הוראה זו נועדה להציג בפני המורים תכנים המאפשרים הרחבת החומר הסטנדרטי של תוכנית הלימודים לאפיק לא מקובל בדרך כלל, אך היכול לאפשר לתלמיד פיתוח יצירתיות, כישורים מוסריים חברתיים והסתכלות- על על נושא הפיזיקה. כמו כן ייתכן שחלק מהדילמות מתאימות להצגה אף בפני כיתות לא פיזיקליות ואף לתלמידי החטיבה. עבור תלמידי מגמת פיזיקה, רצוי שהיחידה תועבר לאחר שלמדו את נושא הביקוע הגרעיני, עבור תלמידים שאינם תלמידי המגמה, ניתן להסתפק בתיאור תופעת הביקוע באופן כללי, עם התייחסות למהלך של בניית פרדיגמה מדעית.

מטרות אופרטיביות

חשיפת מורים לרעיון של שילוב נושא דילמות מוסריות בהוראת הפיזיקה

הצגת רקע היסטורי – מדעי למורה המאפשר לו לבנות מערך שיעור בנושא דילמות מוסריות

מבנה היחידה

ביחידה זו מוצגים שלוש דילמות הקשורות למדע ככלל ולנושא הגרעין בפרט:

א) קריסת פרדיגמה מדעית – דילמה המתארת את הקושי של המדענים להבין מתי הקשיים המתגלים, אינם מעידים על הצורך "לשפץ" את התיאוריות הנוכחיות, אלא על הצורך לבנות פרדיגמה חדשה.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

- (ב) גילויים מדעיים בעלי השלכות מרחיקות לכת על האנושות - האם על המדען לקחת אחריות על ההשלכות הטכנולוגיות הנובעות מתגליותיו ?
- (ג) שימושים בפצצת האטום - שאלות מוסריות הקשורות לשימוש בפצצת האטום.

דילמה א' קריסת פרדיגמה מדעית

בדילמה של האפשרות לקריסת הפרדיגמה המדעית. ניסינו להציף, את אחת מהדילמות הקשות של מדען. בעומדו בפני גילויים הסותרים את תפיסתו המדעית, פעמים רבות עבור המדען, בדיקה של דרך חדשה משמעותה, להשליך לאחור עשרות שנות עמל מדעי, ושוב חוזרת השאלה מתי עליו לתת תשובה מקומית, ומתי עליו להבין שיש צורך לשנות את התפיסה כולה. כמוכן שדילמה זו נוכחת בחייו של כל אדם, אך במדע המנסה לחתור אל האמת בכלים מדויקים, ויסודיים שאלה זו עולה ביתר תוקף.

הרעיון העומד מאחורי דילמה מוסרית זו, נזדקק להשתמש במונחים שטבע תומאס קון, פילוסוף המדע בן המאה העשרים:

גישתו של קון (ויקיפדיה) מדגישה חלוקה ברורה בין שני סוגי מדע: מדע תקני ומדע מהפכני. מדע תקני מתבסס על הישגים מדעיים מסוימים שהושגו בעבר וכרוך בחוק, תיאוריה, החלה ושימוש מעשי. הישגים אלו מספקים דגמים מהם צומחות מסורות מלוכדות של מחקר מדעי. להישגים אלה מייחד קון את המושג **פרדיגמה**.

מדע מהפכני לעומת זאת מבטא את המעבר בין פרדיגמה שלטת אחת לאחרת המחליפה אותה (ריבל, 2012)

מתי, אם כן ניתן לקבוע כי הפרדיגמה השלטת כושלת וצריך להחליפה? האם כדאי לתפור עוד טלאי כדי לכסות על הקשיים או שמא כדאי לוותר על הפרדיגמה הישנה על כל יתרונותיה לצאת לדרך חדשה?

ההיסטוריה המדעית רצופה נקודות של שבר בפרדיגמה, שאילץ את המדענים להתמודד עם גילויים הסותרים את הפרדיגמה הבסיסית איתה הם עבדו. ידועה ומפורסמת ההיסטוריה על משבר של המעבר מהתפיסה הגיאוצנטרית להליוצנטרית. במשבר זה מתקשה הממסד הכנסייתי להתמודד עם טענותיהם של קופרניקוס וגלילאו גליליי בדבר הצורך לעבור לתפיסה הליוצנטרית.

ידוע גם הקושי של המעבר מתיאוריית "עוגת הצימוקים" של ג' ג' תומסון, למודל האטום של ארנסט רתרפורד. כתגובה לניסוי של ארנסט מרסדן, בו התגלו, להפתעתו, חלקיקי אלפא המוחזרים בזוויות גדולות, הגיב רתרפורד במשפט מפורסם: "זה המאורע הלא יאמן ביותר שקרה לי בחיי. כאילו ירית פגז של 15 אינץ' לעבר דף נייר, והפגז הוחזר על ידי הנייר ופגע בדף."

בנושא הגרעין, פחות ידוע הקושי של המדע להתמודד עם הגילוי שנויטרונים מסוגלים לפרק גרעיני אטום בקלות יחסית.

בספר "שבעתיים כאור החמה" מתאר המחבר את קשיי ההתמודדות של המדענים כאשר מוטחים בפניהם התגליות החדשות:

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

"כבר בשנת 1934 כתבה גברת אידה נודאק, בנוגע ליסודות שנוצרו כתוצאה מהפצת אטומי אורניום בנויטרונים " בה במידה אפשר להניח, כי בשעת הריסת הגרעין על-ידי נויטרונים, מתרחשות ראקציות גרעיניות אחרות, משתגלו עד עתה בהשפעת פרוטונים וקרני אלפא על גרעיני האטום. ניתן להעלות על הדעת כי בשעת הרעשת גרעינים כבדים בנויטרונים, נבקעים גרעינים אלה לכמה שברים גדולים יותר, שהם איזוטופים של יסודות מוכרים, אך אינם שכנים של היסודות המוקרנים"

הערה זו הגיעה גם לאוזניו של אנריקו פרמי, אלא שלא נהג בה כובד ראש. ההשערה, כי נויטרונים, שעצמתם פחותה מוולט אחד, ביקעו את גרעין האטום, שידע לעמוד בפני קלעים שעצמתם מיליונים של וולטים, נראתה לו מופרכת. מה גם שטכנאי הרדיום הנודע בעולם, אוטו האן, סמך ידו על דעתו (רק כמה שנים מאוחר יותר ייוודע שהנויטרון בגלל ניטרליותו, לא מעורר כוחות התנגדות חשמליים, כדוגמת האלקטרון, הפרוטון, או חלקיקי אלפא).

רק בסתיו 1938, לאחר פרסום מאמר שלישי של אירן ז'וליו-קירי, שוכנע שטרסמן (אוטו האן ופריץ שטרסמן מבכירי המדענים בעולם באותה תקופה, עבדו באותו זמן במעבדתם שבברלין) בנכונות הטענה. הוא רץ מתוך התרגשות לקומה הראשונה אל האן ודחק בו: "אתה חייב פשוט לקרא דין וחשבון זה!"

אך האן התעקש. "איני מתעניין בכתביה של הגברת שלנו" אמר והוסיף לשאוף בשלווה מן הסיגר. אך שטרסמן לא הניח את נשקו. לפני שהספיק האן לחזור על ה"לאו" שלו, הרצה בפניו חיש את הנקודות החשובות בתיאור החדש. "כרעם פגעו הדברים בהאן", מספר עוזרו. "שוב לא סיים את עישון הסיגר, הניחו בווער על המכתבה, ורץ עמי למטה אל המעבדה".

קשה היה לשכנע את האן, כי שנים על שנים הילך בדרכים מוטעות, כמוהו כשאר החוקרים בעולם, אך משהכיר בשיגאה, הפך פניו וטרח לגלות עקבותיה של האמת. לא קל היה להודות בסדרה של כישלונות, אלא שהודאה זו הביאה אותו לאחר זמן אל הגדולה בהצלחותיו". (יונק, 1990)

למעשה, הדילמה המוסרית העומדת בפני המדען הינה עד כמה להיות ישר. ניתן להמשיך ו"לעגל פינות" עבור הפרדיגמה הישנה, ובלבד שלא להכריז "טעיתי". הגבורה הגדולה של המדען היא היכולת להמשיך ולחתור להוציא את האמת לאור.

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

גילויים מדעיים בעלי השלכות מרחיקות לכת על האנושות

גילויים מדעיים, שיכולים להיות להם גם שימושים הרסניים, האם יש מקום להסתיר אותם, כדי שלא יעשו בהם שימושים לרעת האנושות?

משחר ההיסטוריה ניסתה האנושות לשפר את חייו של האדם בעזרת חידושים טכנולוגיים ו/או מדעיים. רבים מהגילויים יכולים לשמש לשיפור משמעותי של חייו, אך ניתן לעשות בהם גם שימוש לרעה. דוגמה מפורסמת היא גילוי חומר הנפץ. האם מגלהו היה צריך לגנוז אותו כי הוא עלול לגרום להרג של מיליוני אנשים? ואולי מכיוון שהוא גם כלי עזר חשוב יש מקום לנתק בין ההמצאה לשימושים שלה, ולומר שכל המצאה היא ניטרלית, והאחריות הבלעדית מוטלת על המשתמש.

גם הסיפור הבדיוני של בנימין זאב הרצל על סולון בלידיה ששאב את השראתו מדמויות אמיתיות, ניסה להתמודד עם המצאה שהיא לכאורה חיובית ביותר אך מדרדרת בסופו של דבר את המדינה.

על-פי סיפורו של הרצל, בפני קרויסוס מוצגת המצאה [מהפכנית](#) שמאפשרת לייצר כמות בלתי מוגבלת של [מזון](#), ללא צורך בגידול [תבואה](#), ובכך פותרת את הצורך בעמל ומונעת את הפחד ממחסור. עם זאת, ובהתאם לאזהרותיו של סולון, ההמצאה לא מביאה לשיפור ברווחת בני-האדם, מכיוון שהיא הופכת אותם לעצלנים ורודפי-תענוגות, ובהמשך לכך למרדנים ואלמים זה כלפי זה, ומאיימת על יציבותה של החברה כולה. (מתוך ויקיפדיה)

גם על המצאת האינטרנט רבו הדיונים על התועלת הרבה מצד אחד, אך גם על הסכנות הכרוכות עמה.

מכל מקום בשאלת הכוח הגרעיני שאלה זו ניצבת במלוא עוצמתה. לראשונה מדובר בהמצאה שבקלות רבה יכולה להפוך לכלי הרס פיזי לכל כדה"א.

האם למדעני האטום של פרויקט "מנהטן" (פרויקט ייצור הפצצה בזמן מלחמת העולם השנייה) יש אחריות מוסרית למה שקרה בהירושימה ונגסקי ?

לפחות בתחילת הדרך המדענים בפרויקט מנהטן היו במרוץ דמיוני מול מדעני גרמניה הנאצית, ומחשבתם הייתה שאם הם לא ישיגו בתחרות הרי שלהיטלר תהייה פצצה גרעינית, והוא לא יהסס להשתמש בה. בדיעבד התבטא איינשטיין: "אילו ידעתי שלא יעלה בידי הגרמנים לבנות פצצת אטום, לא הייתי מניד אצבע." אולם למעשה גם לאחר שנלקחו בשבי מדעני הגרעין הגרמנים בהיידלברג, ונודע למערב שגרמניה אפילו לא הייתה קרובה לבנייתה של פצצה גרעינית, המשיכה תוכנית מנהטן להתגלגל במלוא עוצמתה. כמובן שהיה צורך למצוא צידוקים חדשים: על הסכנה שהפצצה תיבנה בעתיד ע"י מעצמות עוינות אחרות, ושצריך לגמור את הפיתוח ולדאוג אח"כ שהשימוש יהיה לצורכי שלום.

ד"ר אבי צפוני באתרו מביא: בניסוחו של אלברט איינשטיין: "השתחררותה של האנרגיה האטומית שינתה כל דבר בעולם, חוץ מאורח המחשבה שלנו, ולפיכך אנו צועדים לקראת אסון". ובהמשך הוא מכריז: "אילו ידעתי שפצצת האטום תהיה התוצאה - הייתי נעשה שען".

בסופו של דבר השאלה העקרונית במקומה עומדת, האם יש לקשר בין הממציא, או המדען, לבין היישומים של התגלית?

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

דילמה ג' שימושים בפצצת האטום

באילו מקרים יש הצדקה לשימוש בפצצת אטום?

האם מותר להשתמש בפצצה רק כנגד מטרות צבאיות?

האם יש הבדל מהותי בין שימוש בפצצת אטום, לבין שימוש מסיבי בפצצות קונבנציונליות?

על-פי עקרונות "המלחמה הצודקת", שהתרבות המערבית אימצה, יש להגביל את המלחמה לפי 3 עקרונות (כהן, 1989):

- יציאה למלחמה, רק כחלק מהגנה.
- פגיעה רק בכוחות הלוחמים.
- שימוש בכוח, רק במידה הנדרשת להשגת המשימה הצבאית.

האם פצצה גרעינית יכולה לעמוד בקריטריונים כאלו? האם פצצה תרמו-גרעינית יכולה לעמוד בקריטריונים האלו? (צריך לזכור שסדר הגודל של שטח השמדה של פצצה גרעינית נע סביב מאות מטרים רבועים, ופצצה תרמו-גרעינית סביב מספר ק"מ רבועים)

האם לאור גודל שטח ההשמדה ניתן לקבוע בוודאות שגם אוכלוסייה אזרחית תפגע?

שלוש גישות עיקריות הועלו ביחס לשאלה זו:

- צריך להשבית את הנשק הגרעיני הקיים, כי הוא לא מוסרי במהותו. למשל הסכם רייגן גורבצ'וב ב-1/12/87 (INF) מבטא את הקולות האלו של דה-לגיטימציה לנשק הגרעיני
- על-פי פול ראמזי (כומר פרוטסטנטי) ניתן להתאים גם פצצות גרעיניות לעקרונות המלחמה הצודקת. וזאת ע"י הגבלת השימוש בהם, ובגודלם.
- דווקא הגעה ל"הרג יתר" (היכולת להשמיד את כל כדה"א ע"י המאגר הגרעיני OMNICIDE) כולל היכולת להשמיד גם לאחר ספיגת מתקפה גרעינית, את הצד השני, מבטיחה יציבות ובטחון. כי כל צד יודע שהפצצות קיימות רק כדי שלא ישתמשו בהם, וכל שימוש בהם יביא להשמדה טוטלית. לפי טענה זו דווקא העובדה שהפצצות מאיימות גם על כל האוכלוסייה האזרחית, היא זו שמוסיפה צד מוסרי לפצצה, כי היא מבטיחה את אי השימוש בו. מבחינה זו ההרתעה הגרעינית שונה מכל הרתעה אחרת כי היא היחידה שנועדה כדי שאף פעם לא ישתמשו בו.

האם צריך לכמת את מספר ההרוגים בצבאך מול ההרוגים בצד השני, או שבשביל למנוע הרוגים בצבאך מותר לגבות מחיר כבד יותר בצד השני? אם כן עד כמה?

האם יש הצדקה לשימוש בפצצה, כדי ליצור הרתעה לטווח הרחוק?

מעבר לדיון העקרוני, המציאות מכתובה פעמים רבות מהלכים נוספים. מתברר שהמדענים שהחלו בפיתוח הפצצה לא חשבו שישתמשו בה, במיוחד אם ייוודע שלצד השני אין פצצה נגדית, אולם בפועל השתמשו, ודעתם בקושי נשמעה בקרב מקבלי ההחלטות. מתברר שהנשיא טרומן שהורה על השימוש בפצצה, כמעט ולא התלבט לגבי עצם השימוש בה. הוא החליף בפתאומיות את הנשיא רוזוולט 12/4/45, ועודכן ע"י הפקידים בקיומה של הפצצה והמגמה להפעילה. הוא לא היה מודע די הצורך לקולות שהתנגדו. הפקידים הבכירים גם לא התלבטו יותר מידי, מהשפעת המנגנון

כל קובץ המועלה לאתר נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

עליהם. עצם ההשקעה של ארה"ב בפרויקט מנהטן, של שני ביליון דולר, הביאה להבנה פשוטה שסכום כזה לא הושקע לשווא. נראה שלפקידים הבכירים היה קשה להעלות על הדעת שפרויקט שהביא את אמריקה לעמדת בכורה, יישאר חסוי רק בגלל שיקולים מוסריים צרופים.

רקע זה חושף שאלה נוספת : לראשונה בנושא הגרעיני, הפיתוח המדעי והטכנולוגי אינו ממומן בדרך המסורתית, אלא ממומן ומנוהל ע"י מדינות. המשאבים הנדרשים לעניין הם כה גדולים שאין בכוחה של אוניברסיטה בודדת כלשהי ל'הרים' פרויקט כזה באופן עצמאי. האם כשמדע ממומן ע"י מדינה זה לא מזמין שיקולים שמשקפים אינטרסים פוליטיים, ורמת המוסר שמעורב יורד בצורה דרסטית. כדוגמה ניתן להביא את הטענה שאחת העובדות שהקהתה את הדיון המוסרי בדבר השימוש בפצצת אטום הייתה פצצות התבערה הרבות שצבא בריטניה הטיל על דרדזן הגרמנית, ושצבא ארה"ב הטיל על ערי יפן. פצצות התבערה הבעירו, ושרפו ערים שלמות. על הרקע שלהם, השימוש בפצצת אטום כפצצת תבערה גדולה יותר, היה נראה כמעט לגיטימי.

דוגמה נוספת לבעייתיות של התערבות הפוליטיקה היא שמונה ימים לפני הטלת הפצצה הראשונה 16/7/45 כותב הנשיא טרומן "אני מקווה לשלום, אך אני חושש שהמכונה תמיד תהא משגת את המוסר, וכאשר המוסר ידביק, יתכן וכבר לא יהיה טעם בכל זה. אני מקווה שלא כך יהיה, אך בסופו של דבר אנו רק נמלים קטנות על-פני האדמה. ואולי ככל שנתחפר יותר באדמה, נוכל להרהר במשמעות מעשינו. מי יודע ?

מי שכתב מילים אלו הוא אותו נשיא שיטיל שמונה ימים אח"כ את הפצצה הראשונה, ובסוף שנת 49 יורה גם על פיתוח הפצצה התרמו-גרעינית.

ומה בדבר המאיץ בצרון? ראו הסיום של המאמר בגיליון "תהודה" במלאת 40 שנה למותו של עמוס דה שליט (לא מצאתי – מה מספר הגיליון?)

קישורים להרחבה :

<http://www.e-mago.co.il/Editor/history-128.htm>

<http://www.gilihaskin.com/Article.Asp?ArticleNum=6>

ביבליוגרפיה

Blin-Stoyle, R. (1991). *Nuclear and Particle Physics*. London: Chapman & Hall.

Elton, L. (1966). *intoductory Nuclear Theory*. Philadelphia: W.B. Saunders Company.

ויקיפדיה. Retrieved 2012, from *תומאס קון* (n.d.).

יונק, ר. (1990). *שבעתיים כאור החמה*. מחברות לספרות.

כהן, א. (1989). *העידן הגרעיני כהיסטוריה מוסרית*. האוניברסיטה המשודרת.

פיזיקה, מ. (2012, 7 25). *אתר מפמ"ר הפיזיקה*. Retrieved 10 22, 2012, from *משרד החינוך*,

המזכירות הפדגוגית :

http://cms.education.gov.il/EducationCMS/Units/Mazkirut_Pedagogit/Phizika/TochnitLimudim/5yachal/matarot.htm

ריבל, ח. פ. (2012, 1 30). *תומאס קון*. Retrieved 2012, from ויקיפדיה.